

# GREENH<sub>2</sub>PIPES

DESARROLLO DE COMPONENTES INNOVADORES PARA LA GENERACIÓN DE H<sub>2</sub> POR ELECTROLISIS, SU INYECCIÓN EN LA RED DE GAS NATURAL Y SU TRANSPORTE A PARTIR DE PORTADORES LÍQUIDOS

## INFORME ACTIVIDAD 3

### Prototipo de nueva generación de electrolizador PEM de 25 kW

RESPONSABLE(S)	H2Greem Global Solutions
PARTICIPANTE(S)	AMES, Rovalma, Neklar, Nano4Energy

## ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DE LA ACTIVIDAD Y TAREA.....</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LAS TAREAS .....</b>	<b>3</b>
	Tarea 3.1: Estudio de nuevos diseños a nivel de celda de 400 cm <sup>2</sup> .....	3
	<i>Estampado</i> .....	3
	<i>Aditivo</i> .....	5
	Tarea 3.2: Diseño del stack de electrólisis PEM optimizado de 20 kW .....	7
	Subtarea 3.2.2: Fabricación de las placas bipolares.....	10
	Subtarea 3.2.3: Fabricación de colectores de corriente .....	11
	Subtarea 3.2.4 Fabricación de recubrimientos para placas bipolares .....	11
	Tarea 3.3: Desarrollo del BoP y sistema de control.....	12
	<i>Régimen estacionario</i> .....	12
	<i>Régimen transitorio</i> .....	12

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DE LA ACTIVIDAD Y TAREA

Con el objetivo de optimizar el diseño de celdas y stacks, esta tarea ha estado enfocada en el desarrollo y la fabricación de una nueva generación de electrolizadores, materializada en un prototipo de 20 kW. Asimismo, se ha desarrollado un nuevo diseño del balance de planta (BoP) y del sistema de control, estableciendo las bases tecnológicas necesarias para su escalado a nivel industrial. Estos avances permitirán la producción de hidrógeno verde con una mayor eficiencia y a un coste competitivo.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TAREAS

### Tarea 3.1: Estudio de nuevos diseños a nivel de celda de 400 cm<sup>2</sup>

#### Estampado

El desarrollo de las placas bipolares (BPs) mediante estampación ha requerido un intenso trabajo de diseño y validación debido al papel crítico del marco, responsable de asegurar la contención del flujo bifásico, el mantenimiento de la consistencia mecánica del stack, el alojamiento de juntas de sellado y la correcta distribución de los fluidos a través de los canales.

El proceso comenzó con la adaptación de diseños previos para aumentar la densidad de canales, lo que redujo el espesor de la monocelda y obligó a redimensionar componentes clave. Entre las principales modificaciones se encuentra la reducción del diámetro de las juntas tóricas de 2 mm a 1 mm, así como la disminución de la superficie de membrana en un 40% mediante el desacople de juntas en ambas caras del marco, situando la junta en contacto con la membrana muy próxima al área activa. Para garantizar la integridad estructural se añadieron pivotes de refuerzo en entradas y salidas, que además actúan como guías fluidodinámicas.

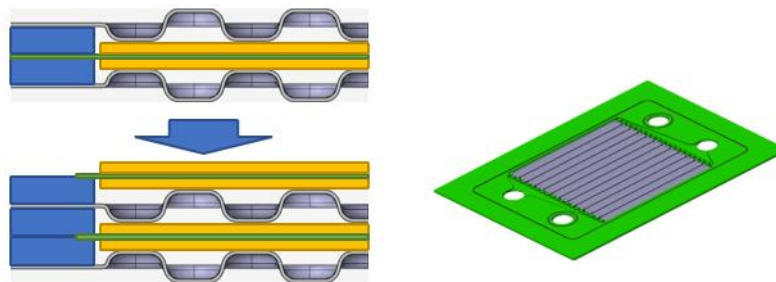


Figura 1. Esquema de reducción de la membrana

Durante la evolución del diseño se optó por sustituir las tóricas por juntas planas, analizando espesores de 0,5, 0,75 y 1 mm. Tras estudios CFD y FEM, se determinó que el espesor óptimo era 1 mm, al ofrecer un buen compromiso entre integridad mecánica, espacio disponible y comportamiento fluidodinámico, evitando pérdidas de área útil para el paso del agua. Esta decisión implicó rediseñar apoyos y caminos de transmisión de esfuerzos, adaptando la geometría de pivotes y entradas para asegurar un sellado fiable.

Otro hito relevante fue la incorporación de dos entradas y salidas en lugar de una, lo que mejoró la distribución del caudal en condiciones de alta densidad de corriente y redujo la acumulación de gases en zonas críticas. No obstante, estudios CFD revelaron

persistencia de problemas en el canal izquierdo, con velocidades muy bajas que podían generar puntos calientes por limitaciones de transferencia de masa. Para mitigar este riesgo se introdujeron ajustes adicionales que incrementaron la homogeneidad de velocidad en los canales y la distribución de fracción de gas.

La comparación entre las versiones Estampación 1 y Estampación 2 evidenció que, pese a las restricciones mecánicas (posición y tamaño de pivotes, reducción de espesor de junta), la segunda versión logró una evacuación de gases más eficiente, disminuyendo la concentración en puntos conflictivos.

En conjunto, el rediseño de las placas bipolares mediante estampación ha permitido alcanzar un equilibrio entre robustez mecánica, sellado efectivo y eficiencia fluidodinámica, validado por simulaciones numéricas (CFD y FEM). Estas mejoras representan un avance significativo en la fiabilidad y el rendimiento de los stacks, especialmente en aplicaciones a altas densidades de corriente.

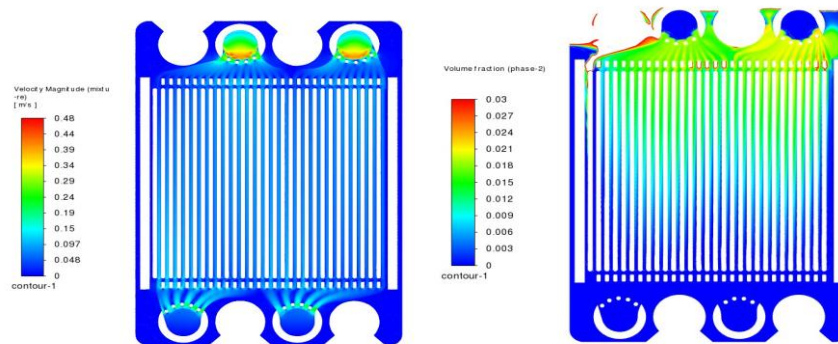


Figura 2. Resultados de estudios CFD con generación de puntos calientes en el sistema

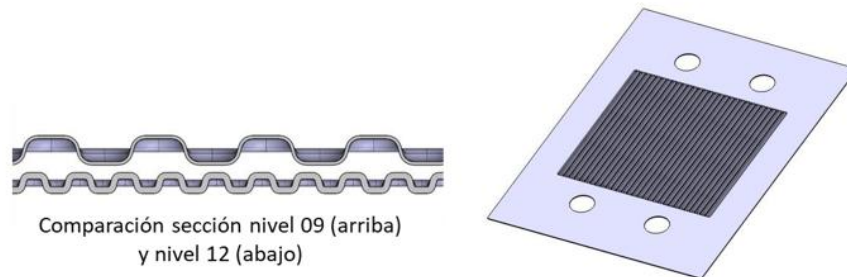
Se realizaron simulaciones FEM 2D axilsimétricas sobre el concepto de monocelda con juntas tóricas (Status 01-23), empleando las dimensiones de canales y espesores de la placa bipolar estampada, con el objetivo de analizar el comportamiento mecánico de sus componentes. El modelo consideró juntas de 0,5 mm en NBR y EPDM, evaluando especialmente la zona de sellado de la membrana. Los resultados evidenciaron la necesidad de desfasar las juntas en la zona activa, además de mostrar limitaciones de resistencia en la placa bipolar (nivel 09), falta de uniformidad en la compresión PTL/membrana y varios aspectos de diseño a optimizar.

A partir de estas conclusiones, se desarrolló un nuevo diseño (Status 07-23), incorporando mejoras como:

- Juntas a espesor 0,5 mm (pendiente de confirmación).
- Placa bipolar estampada nivel 12, con 1 mm de espesor, altura y paso reducidos.
- Colaboración con CNH2 y proveedores especializados (Trelleborg para juntas y Ensinger para marcos de PEEK).

La evolución de nivel 09 a 12 implicó una optimización geométrica: reducción de la altura de estampación de 2 a 1,1 mm, disminución de la longitud de onda del canal de 16,5 a 7 mm y aumento del espesor de la chapa de 0,5 a 1 mm. Las simulaciones confirmaron

deformaciones bajo la curva FLD y un adelgazamiento máximo en torno al 30%, validando la viabilidad del diseño. Esto permitió preparar el anteproyecto del estampador prototipo, confirmando mediante FEM la distribución de tensiones en BPP, marcos y PTL bajo condiciones de sellado y apriete.



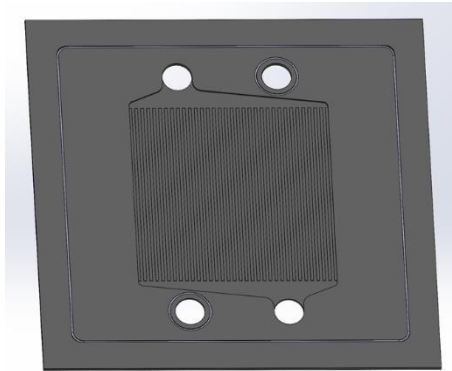
*Figura 3. Evolución de la BPP estampada*

En paralelo, se analizaron conceptos de BPP fabricadas mediante tecnología aditiva, cuyo comportamiento mecánico se asemeja más a las placas mecanizadas tradicionales. Durante este proceso, el proveedor de juntas recomendó sustituir las tóricas por juntas planas HMF17, debido a las limitaciones de tamaño detectadas en los diseños previos. Para validar este nuevo concepto se realizaron simulaciones 3D con contactos y materiales no lineales (Neo-Hooke y Ogden), evaluando el marco con juntas prensado entre placas metálicas. Los resultados permitieron identificar desplazamientos, presiones de contacto y concentraciones de tensiones en pivotes y zonas críticas, definiendo las modificaciones de diseño necesarias para consolidar el concepto.

En conclusión, la combinación de simulaciones FEM y análisis iterativos permitió optimizar tanto la geometría de la placa bipolar estampada como el sistema de sellado. La transición desde juntas tóricas a juntas planas y la validación de las configuraciones mediante modelos avanzados suponen un avance decisivo hacia un diseño más robusto, fiable y adaptado a los requisitos de fabricación y operación.

#### Aditivo

La aplicación de tecnologías aditivas en la fabricación de placas bipolares ofrece como principal ventaja la flexibilidad de diseño, lo que permite integrar el marco directamente en la placa y reducir así el número de componentes del sistema. El primer diseño partió de una adaptación del marco empleado en estampado, aprovechando su capacidad de distribución de flujo. No obstante, este presentaba un riesgo: las zonas excavadas para el paso del agua estaban en contacto con la membrana, lo que podía provocar su flexión y obstruir el flujo.



*Figura 4. Diseño propuesto para el marco mediante tecnología aditiva*

Para resolver este problema, se desarrolló un segundo diseño en el que dichas cavidades fueron cubiertas, logrando además simplificar el sistema de juntas al limitarlas a las entradas, salidas y al perímetro del área activa. Se mantuvieron criterios como el desfase entre juntas de ambas caras. Sin embargo, este diseño fue descartado debido a dos limitaciones: la imposibilidad de aplicar recubrimientos en las cavidades, y la reducción de membrana aplicada como en estampado, lo cual resultaba problemático al no existir un marco que actuase como aislante eléctrico entre las placas bipolares.

Ante estas dificultades, se plantearon dos líneas de diseño alternativas:

**Marco simple:** incorporar un marco similar al de estampado, aunque simplificado y fabricado en el mismo proceso aditivo. Su principal desventaja es que se pierde la reducción de componentes, que constituye la gran ventaja de esta tecnología.

**Kapton:** extender la membrana mediante una lámina de poliamida, material con propiedades químicas, eléctricas y mecánicas adecuadas, que actúe como aislante entre las dos BPs. Para validar esta solución se realizaron pruebas de aislamiento eléctrico y de estanqueidad en el contacto Nafion–Kapton, con resultados satisfactorios frente a riesgos de crossover.

En paralelo, y tras las observaciones de Trelleborg sobre las dificultades del uso de juntas tóricas, se ajustaron los diseños para la incorporación de juntas planas. Además, la eliminación de cavidades reintrodujo el problema de la flexión de la membrana, que podría obstruir el paso del agua. La solución adoptada consistió en extender los canales más allá del área activa y darle una altura superior al espesor de la PTL, lo que mejora la fluidodinámica y previene el flectado de la membrana. No obstante, esta propuesta aún requiere optimización adicional.

En resumen, la tecnología aditiva permite explorar conceptos de mayor integración y simplicidad en las placas bipolares, pero plantea retos específicos en aspectos como el aislamiento eléctrico, el sellado y la aplicabilidad de recubrimientos. Las soluciones desarrolladas —marco simplificado y extensión mediante Kapton— constituyen avances hacia un diseño viable, aunque todavía en fase de validación y mejora.

Una vez definido un diseño preliminarmente funcional, y aprovechando la ventaja de que en la fabricación aditiva no se requieren utillajes, se decidió producir prototipos a escala reducida (50 mm<sup>2</sup>) con el doble objetivo de verificar la viabilidad del proceso de

impresión y, en caso de ser posible, evaluar también su desempeño operativo en laboratorio.

Se ensayaron diferentes parámetros de impresión y variantes de diseño (incluyendo configuraciones con Kapton y con juntas tóricas), dado que el material empleado, acero inoxidable AISI 316L, no era un campo de experiencia consolidado para ROVALMA. El propósito de estos ajustes fue optimizar el acabado superficial y alcanzar la mayor calidad geométrica posible en las piezas resultantes.

Tras la impresión, las placas bipolares fueron sometidas a un análisis de geometría mediante escaneado, comparando los resultados con el diseño nominal para cuantificar las desviaciones. Este control permitió identificar defectos y orientar las sucesivas iteraciones de impresión.

Finalmente, después de varias pruebas, se establecieron parámetros de impresión que aseguraron que las deformaciones quedaran dentro de las tolerancias de fabricación requeridas, validando así la viabilidad del proceso y consolidando un punto de partida robusto para la fabricación de prototipos funcionales en tamaños mayores y su futura evaluación operativa.

### Tarea 3.2: Diseño del stack de electrólisis PEM optimizado de 20 kW

La etapa final del proyecto se centró en validar el sistema mediante su montaje e integración en condiciones controladas. Debido a limitaciones presupuestarias, no fue posible validar experimentalmente todos los materiales previstos, lo que llevó a modificar el diseño original. Se sustituyeron las juntas iniciales por alternativas más económicas y técnicas. En el ensamblaje se usaron placas bipolares adaptadas al diseño original de H2Greem Global Solutions y juntas que mejoran resistencia y estanqueidad. Los electrodos de AMES se recubrieron con el catalizador previamente desarrollado, optimizando la integración electroquímica del sistema.

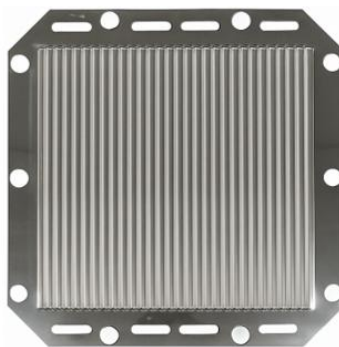


Figura 5. Placa bipolar original H2Pipes adaptada al diseño de H2Greem

El montaje del sistema se realizó siguiendo un procedimiento controlado que incluyó la preparación de todos los componentes y el uso de placas de titanio de 5 mm por su resistencia a la corrosión y capacidad de compresión uniforme. Cada celda se ensambló con placas bipolares, electrodos, membranas y juntas adaptadas al nuevo diseño. El

apriete se efectuó con par controlado y se realizaron pruebas de estanqueidad y verificación eléctrica. Gracias a este proceso, se obtuvo un stack PEM funcional, optimizado técnica y económicamente, y listo para su validación en condiciones reales.



*Figura 6. Stack PEM final.*

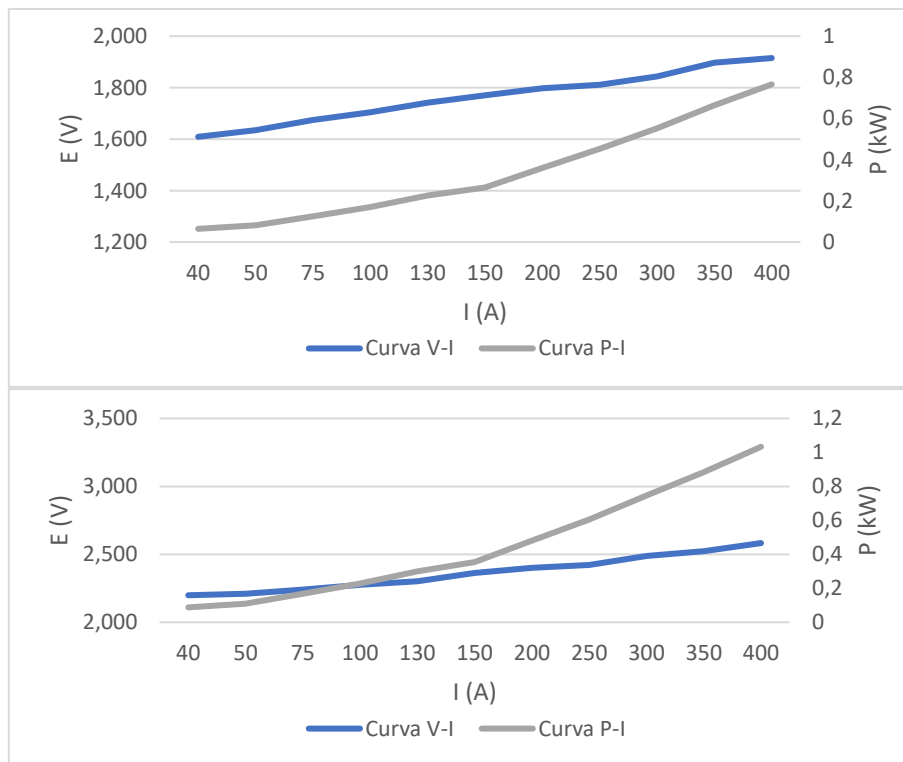
Para validar el stack, se realizaron ensayos electroquímicos y operativos para evaluar su rendimiento, eficiencia y comportamiento en distintas condiciones. Estos análisis buscan confirmar la viabilidad técnica del sistema y su contribución a reducir costes (CAPEX) sin comprometer durabilidad ni eficiencia. La caracterización se efectuó mediante curvas de polarización I–V, que permiten estudiar la relación corriente-voltaje y las pérdidas del sistema. Los resultados iniciales proporcionan los parámetros de referencia del stack al inicio de su vida útil, base para futuras pruebas de durabilidad y operación prolongada.

*Tabla 1. Parámetros de la celda.*

Parámetros de la celda	
Superficie activa (cm <sup>2</sup> )	400
Corriente (A)	400
Densidad de corriente (A/cm <sup>2</sup> )	1
Tensión (V)	1,915
Eficiencia <sup>1</sup> (%)	80±5
Potencia (kW)	0,8
Producción (m <sup>3</sup> /h)	7,6
Tiempo vida útil (h)	50000

La gráfica presenta las curvas voltaje-corriente (V-I) y potencia-corriente (P-I) de una celda PEM en el rango de 40 a 400 A, permitiendo evaluar su desempeño bajo distintas cargas. La curva V-I muestra un aumento de voltaje de 1,6 a 1,9 V, con una pendiente moderada que indica baja resistencia interna y un diseño eficiente de la celda. La curva P-I alcanza un máximo cercano a 0,8 kW, evidenciando un funcionamiento estable y una eficiencia constante sin degradación significativa. Estos resultados validan la fiabilidad del diseño modificado, en el que la sustitución de las juntas originales por alternativas más económicas permitió mantener la funcionalidad y el rendimiento global del sistema.

Para analizar la evolución del rendimiento del stack PEM durante su vida útil, se compararon las curvas de polarización registradas al inicio y al final de su operación. La figura muestra las curvas de voltaje-corriente (V-I) y potencia-corriente (P-I) correspondientes al final de vida, lo que permite evaluar los cambios en el comportamiento electroquímico y la estabilidad del sistema tras su uso prolongado.



**Figura 7.** Curvas de polarización inicial de voltaje-intensidad (verde) y potencia-intensidad (azul) para una celda PEM a inicio de vida (arriba) y final de vida (abajo).

Los datos del final de vida útil del stack PEM fueron estimados según su perfil de operación y horas acumuladas ( $\approx 50\ 000$  h), permitiendo aproximar su comportamiento en condiciones de envejecimiento. En la fase inicial, la curva V-I muestra tensiones de 1,60 V a 1,90 V entre 40 A y 400 A, reflejando alta eficiencia. Al final de la vida útil, las tensiones aumentan hasta 2,20–2,60 V, evidenciando mayores pérdidas internas por degradación de la membrana, el catalizador y los contactos eléctricos.

La potencia máxima pasa de 0,8 kW a 1,0 kW, incremento asociado al mayor consumo energético, no a una mejora de rendimiento, lo que indica una pérdida de eficiencia global. El análisis confirma el deterioro progresivo del stack por envejecimiento típico de las tecnologías PEM: degradación de materiales activos, aumento de resistencias de contacto y posible daño estructural de los electrodos.

Las curvas de polarización se destacan como herramientas clave para evaluar, optimizar y comprender los procesos electroquímicos, contribuyendo al desarrollo de electrolizadores más eficientes y duraderos.

### Subtarea 3.2.2: Fabricación de las placas bipolares

Tras validar el diseño, se fabricaron las placas bipolares mediante estampación metálica. Simulaciones previas mostraron un adelgazamiento controlado del material en las crestas de los canales (20% en los centrales y 12% en los extremos), lo que llevó a ajustar las superficies de mecanizado para homogeneizar la geometría. El utillaje se diseñó con acero tratado térmicamente y se probó en una prensa de 160 Tm antes de realizar la estampación final en una prensa hidráulica de 1000 Tm, usando acero inoxidable 1.4404 de 1 mm.

Los resultados coincidieron con las simulaciones: no hubo roturas ni deformaciones críticas, aunque se observó un leve retorno elástico. Las mediciones confirmaron la precisión del proceso (profundidades entre 2,17 y 2,22 mm frente a 2,20 mm nominal). Tras el estampado, las piezas se cortaron por láser para su acabado final.

Con estas placas listas, el proyecto avanza hacia la integración en un stack PEM de 20 kW, etapa clave para validar el desempeño real de los componentes y avanzar hacia la industrialización, evaluando la viabilidad técnica, eficiencia y robustez del diseño.

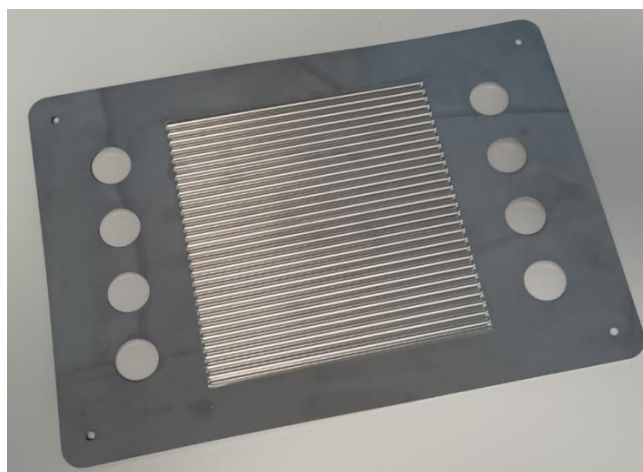


Figura 8. Placa bipolar terminada

### Subtarea 3.2.3: Fabricación de colectores de corriente

Tras la sinterización de los PTLs en el hito anterior, este hito se centró en las fases de calibrado, laminado y corte para optimizar su planicidad, paralelismo, rugosidad y espesor. Las mediciones iniciales mostraron que el calibrado por sí solo no garantizaba los valores requeridos, por lo que se añadió una etapa de laminado adicional. Este proceso, realizado por IDONIAL con un laminador en frío DUU300, permitió alcanzar el espesor objetivo de 0,96 mm, necesario para asegurar un correcto contacto entre los componentes del stack. El laminado se efectuó en la dirección del mayor espesor, logrando uniformidad y mejor calidad superficial en los PTLs.

La figura 9 muestra los valores de espesor, rugosidad, planicidad y paralelismo de los PTLs ánodo y cátodo en las diferentes etapas de sinterizado (S1), calibrado (P2) y laminado (L). Las mejoras en ambos materiales son evidentes tras la fase final de laminado.

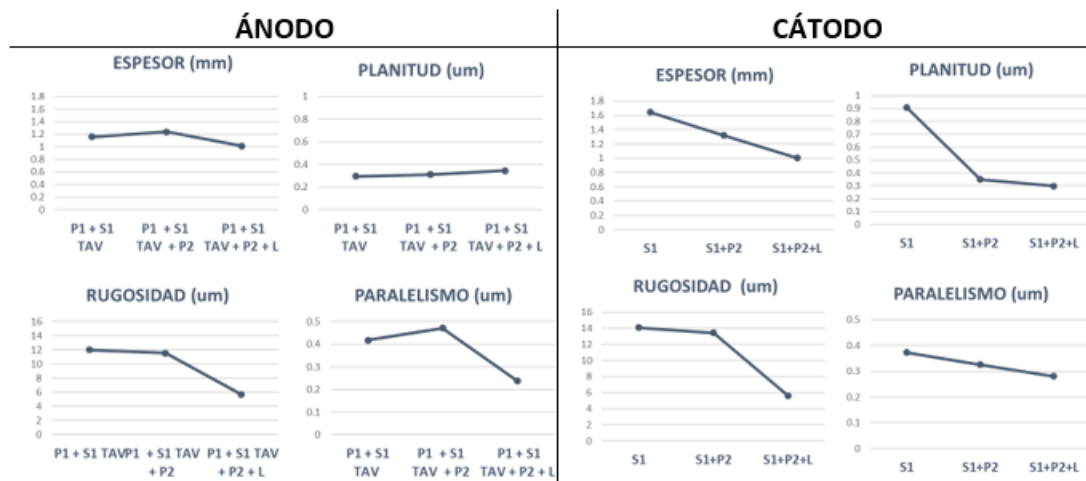


Figura 9. Evolución de los diferentes parámetros medidos en las diferentes fases de fabricación de los PTLs

En la etapa final del proceso se ajustaron las dimensiones de los PTLs para su correcta integración con el resto de componentes del stack. Se evaluaron diferentes métodos de corte —láser, mecanizado y chorro de agua— con el fin de determinar el más adecuado para las características del material. Tras las pruebas, se seleccionó el corte en centro de mecanizado, que ofreció los mejores resultados en precisión y acabado superficial, permitiendo preparar los PTLs para el apilamiento final del stack. Una vez terminados los PTLs fueron enviados a H2Greem para conformar el apilamiento de los stacks.

### Subtarea 3.2.4 Fabricación de recubrimientos para placas bipolares

En esta subtarea, los procesos de recubrimiento mediante HiPIMS se transfirieron de sistemas de laboratorio batch-coater a un sistema de producción inline, que integra de forma continua todas las etapas del proceso, aumentando la productividad y reduciendo costes. El sistema consta de varios módulos:

1. Carga de muestras: montaje de las piezas sobre el tráiler.
2. Limpieza por plasma: evacuación y limpieza iónica de las superficies.
3. Recubrimiento: aplicación de recubrimientos HiPIMS; en cátodos se deposita primero niobio y luego carbono, y en ánodos NbTi seguido de platino.
4. Calibración: pruebas para asegurar espesor y estructura uniformes, logrando una reducción de tiempos de hasta 10x y capacidad de hasta 400 m<sup>2</sup>/día.
5. Descarga: retiro de las piezas recubiertas del tráiler.
- 6.

El sistema inline permite un flujo continuo eficiente y reproducible, mejorando significativamente los tiempos y la capacidad frente a los procesos batch.

### Tarea 3.3: Desarrollo del BoP y sistema de control.

Se ha optimizado el Balance of Plant (BoP) del electrolizador para reducir costes y complejidad sin afectar la eficiencia. El sistema está organizado en tres armarios autoportantes (adecuación de agua, producción y control/distribución) con componentes externos como chiller y transformador, y protege la operación mediante ventilación y un UPS/SAI.

El electrolizador integra un stack único de 30 celdas de 400 cm<sup>2</sup> cada una, con conducciones y accesorios en materiales resistentes a presión y temperatura. El agua de proceso requiere calidad ASTM Tipo II, tratándose según su origen mediante filtrado, ósmosis y desionización; el sistema mantiene la conductividad cercana a 0 µS/cm con recirculación y control automático.

Dispone de separadores líquido-gas: oxígeno (22 L, 30 bar) e hidrógeno (8 L, 30 bar) para decantar condensados y asegurar presión.

El electrolizador opera en dos modos:

#### Régimen estacionario

- Producción continua con control automático de nivel de agua y tratamiento según calidad.
- Recirculación por resinas desionizantes.
- Inertización previa y calentamiento del agua (rampa o pre-producción).
- Presurización del separador de H<sub>2</sub>; el hidrógeno producido se dirige a sistemas de secado/purificación y salida de baja pureza.
- Reducción progresiva de corriente si no hay consumo; oxígeno evacuado para mantener diferencial de presión.

#### Régimen transitorio

- Stand-by con corriente 0 A y mantenimiento de temperatura.
- Reactivación automática al disminuir presión de la línea (≈30 s).

- Modos de control de temperatura: Heating (arranque rápido) y Anti-icing (evitar congelación).

Con estas configuraciones, el BoP está listo para operación continua, asegurando control eficiente de temperatura y presión, y producción segura de hidrógeno en todas las condiciones de operación.